哲学与物理学相遇在量子世界

郝刘祥

1 中国科学院哲学研究所 北京 100049
2 中国科学院大学 人文学院 北京 100049

摘要 文章通过分析量子力学中量子态的本体论地位问题、量子场论中何谓基本粒子问题，以及量子引力理论中时间是否存在的问题，表明科学理论的内核是一些基本的形而上学预设。文章指出，哲学与物理学的关系，颇类似于数学与物理学的关系，因此在物理学和哲学之间建立更紧密的联盟，会有助于这些问题的澄清与解决。

关键词 量子态，基本粒子，时间问题，实在，实体，关系，性质

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20210116002

自从17世纪伽利略和牛顿创立现代物理学以来，物理学与哲学两者之间呈现出一种渐行渐远的趋势。19世纪兴起的法国实证主义哲学和德国浪漫主义哲学，标志着哲学家自动退出了以知识和真理为目标的认识世界的活动。作为这两大哲学思潮的余脉，20世纪的逻辑实证主义和存在主义分别将哲学局限于语言分析和生活世界。

哲学领地的收缩与科学领地的扩张是相伴而生的。现代科学不仅获得了传统上被哲学和宗教所垄断的关于宇宙、生命和心灵的解释权，同时通过技术应用极大地拓展了人类感官、躯体乃至智力的疆界。科学方法在认知和操控自然方面所取得的巨大进展，使得不少科学家，突出的如费曼（Richard Feynman）、霍金（Stephen Hawking）和温伯格（Steven Weinberg）等，对哲学持一种漠视甚至排斥态度[1]。

哲学家的“退守”和科学家的“傲慢”，从不同角度反映出当代学术界对所谓“科学方法”的严重曲解，以为科学方法无非是数学方法和实验方法，忘却了科学的前身正是古希腊的自然哲学这一历史事实。按照当代著名科学史家弗洛里斯·科恩（Floris Cohen）关于现代科学起源的研究，牛顿力学的诞生事实上是3种不同认识世界的方式的综合，即古希腊哲学家（如柏拉图和亚里士多德）认识世界的方式、希腊化时代数学家（如阿基米德和阿波罗尼乌斯）认识世界的方式和文艺复兴时期的工程师（如达·芬奇）探索世界的方式的综合[2]。哲学方法，即通过预设基本实体（如物质、时空和相互作用）从而建立起理解世界的基本概念框架的方法，本身就是科学方法的核心要素。只不过，相比于古代的自然哲学，现代

修改稿收到日期：2020年1月14日

物理学中的本体论承诺需要接受数学化表征和介入性实验的双重制约[3]。

弗洛里斯·科恩关于现代科学起源的历史研究，与当代著名哲学家蒯因（W. V. O. Quine）关于科学理论结构的哲学论述可谓不谋而合。蒯因认为，科学理论的边缘是经验知识，内部是理论知识（特别是数学化的理论知识），其硬核则是逻辑和形而上学，即该理论的本体论承诺。因此，无论从历史角度，还是从逻辑角度，哲学与物理学的关系，都应该类似于数学与物理学的关系。

本文的目标不是去检讨哲学家和科学家关于哲学与科学之间关系的偏颇看法，而是结合量子理论发展的历史和现状，通过 3 个具体问题——量子态的本体论地位、量子场论中的基本粒子是什么和量子引力中的时间问题——来表明，哲学和科学需要建立更加紧密的联盟。显然，这 3 个问题既是科学问题，同时也是哲学问题，分别触及量子力学、量子场论和量子引力理论的内核部分。

1 表征与实在：量子态的本体论地位

量子力学无疑是迄今最为成功的物理学理论之一，其形式体系不仅是我们理解微观世界和宇宙早期演化的理论基础，同时也是激光和半导体等现代核心技术的理论基础。但自量子力学诞生以来，关于这个形式体系的诠释问题一直困扰着一代代物理学家和哲学家。理论物理学的终极理论之梦、量子计算和量子信息技术的发展前景，以及哲学上重建形而上学的愿景，都取决于人们对这一问题的认识。这个问题的核心是，量子态是否表征客观的物理实在。

薛定谔在创立波动力学之初曾相信，波函数 $\psi(x)$ 是像光波一样真实存在于三维空间中的波，但他的这一信念很快就被玻恩的几率解释所动摇。自从玻恩提出波函数的几率解释以来，物理学家关于量子态的本体论地位，持有截然相反的两种观点①：① ψ-epistemic 观点——将量子态看成是认知态或知识态，认为仅有认识论上的意义，其本身并不具备本体论地位；② ψ-ontic观点——将量子态看成是本体态，认为 ψ 本身即表征了物理实在，因而具有本体论地位。

严格来讲，ψ-epistemic 和 ψ-ontic 的区分，仅仅对实在论者才有意义。对于反实在论者（特别是经验论者和实证论者）而言，所有的科学理论，包括量子力学理论在内，都只是“拯救现象”（to save the phenomena）的工具，并不揭示实在的本性。根据这一区分，爱因斯坦显然认同 ψ-epistemic 的立场，因为他相信量子力学将来会作为某个完备理论的极限而被推导出来。而冯·诺依曼（von Neumann）、玻姆（D. Bohm）和埃弗雷特（H. Everett）尽管对量子力学的形式体系提出了迥然不同的哲学诠释，但都属于 ψ-ontic 的阵营。冯·诺依曼关于测量问题的投影假设明确承认了量子态的本体论地位，测量只是引起态函数的坍缩。在玻姆力学中，$\psi(x)$ 尽管不能完备地描述实在，但它与隐变量 x 一起共同构成了实在的完备描述，因此波函数的实在性是无可置疑的。在埃弗雷特的相对态或多世界诠释中，宇宙波函数（universal wave-function）是真正的客观实在。

为了对 ψ-epistemic 与 ψ-ontic 之间的直观区分做出更精准的刻画，2010 年 Harrigan 和 Spekkens[4] 提出了量子力学的“本体论模型”（ontological model）。这一模型假定：① 每个量子系统都有一个本体态（即真实的物理态）$\lambda \in \Lambda$，Λ 为量子系统的本体态空间；② 希尔伯特空间 H 中的每个量子态 $\psi \in H$ 对应于本体态空间 Λ 上的一个分布 $\mu_\psi(\lambda)$；③ 对量子系统进行测量时，测量装置 M 和量子系统的本

① Leifer M. Can the quantum state be interpreted statistically? http://mattleifer.info/2011/11/20.

体态 λ 完全决定了测量结果为 k 的几率 $\xi_k^M(\lambda)$；④ 本体论模型给出的结果必须与量子力学的预言完全一致，即

$$<k|P_k|\psi>=\int_\Lambda \xi_k^M(\lambda)\ \mu_\psi(\lambda)\mathrm{d}\lambda。\qquad (1)$$

式（1）左边是量子力学几率，P_k 是对量子态 ψ 进行测量得到结果 k 的投影算符；右边是本体论模型给出的几率。2012 年，Pussey 等[5]证明，如果量子系统满足量子力学的本体论模型和量子态的独立制备假设，那么量子态具有实在性——任意两个非正交的量子态所对应的本体态分布没有相交的紧支集。这一结论现今称为“PBR 定理”②，被认为是贝尔不等式证明以来量子力学基础研究中最重要的进展。

PBR 定理似乎表明，除非站在反实在论的立场，认为科学理论不过是用来解释和预测现象的工具，否则就得承认量子态的实在性。目前，学术界关于 PBR 定理意义的讨论，多集中于独立制备假设的可靠性，以便为 ψ-epistemic的立场开辟空间。但在笔者看来，PBR定理对于量子力学诠释的真正意义在于本体论模型与其结论之间的关系：如果量子态对应于本体态的一个分布，并且对量子系统的测量结果不超出量子力学的预言，那么任意两个非正交的量子态所对应的本体态分布没有交集。借用科学哲学术语，PBR 定理揭示了量子力学中表征（量子态）与实在（本体态）之间的关系。

Jammer[6]指出：“（量子力学的）形式体系超前于它本身的诠释，这种事态在物理学史上是独一无二的。”在物理学史上，通常我们都是先确认实在（如力或场），然后再建立数学表征（如万有引力定理或麦克斯韦方程组）。但在量子力学中，我们是先有形式体系，然后来确认物理实在。根据 PBR 定理，量子态与本体态的关系不是一一对应关系，而是一多对应关系。这一结论其实已经隐含在 Montina[7]早先证明的“本体态空间的非收缩定理”（no-shrinking theorem）之中。换言之，量子态是本体态的“缩影”或“投影”，本体态空间是希尔伯特空间的覆盖空间。PBR 定理所揭示的量子力学中表征与实在之间的关系，正是柏拉图借“洞穴之喻”所传达的人类认知困境：量子态好比是“洞穴之喻”中的囚徒所看到的真实事物的影子，本体态则是那个走出洞穴的囚徒所看到的阳光之下的真实事物。

PBR 定理还意味着，只要我们拒绝接受量子力学的本体论模型，那么 ψ-epistemic 的诠释仍然是可能的[8]。就像爱因斯坦主张的那样，如果量子力学是未来某个基础理论的极限情形，那么量子力学的本体态和量子态之间就不存在本体论模型中所假设的对应关系。爱因斯坦[9]说：“毫无疑问，量子力学已经抓住了真理的美妙成分，对其未来的任何理论基础来说，它都将是一块‘试金石’。因为它必须能够作为一个极限情况从该基础理论推演出来，正像静电学能够从麦克斯韦电磁理论推演出来，或者像热力学能够从古典力学推演出来一样。可是我不相信量子力学能够用来作为探求这种基石的出发点，正像人们不能相反地从热力学（关系到统计力学）中找到力学的基础一样。”

在笔者看来，量子理论与未来的基础理论之间的关系，可能更接近牛顿引力理论与广义相对论之间的关系。今天的物理学家难以接受量子力学中的非定域关联，正如当年的科学家难以接受牛顿的超距作用观念一样。在牛顿本人看来，超距作用是真实存在的。至于超距作用是如何实现的，他说，“我不杜撰假说”。《自然哲学的数学原理》出版后，牛顿给惠更斯和莱布尼兹各送了一本，但两人都拒绝接受牛顿的超距作用概念：惠更斯认为超距吸引力的概念是“荒谬的”；莱布尼兹对牛顿不解释引力定律的原因“大为震惊”，在其看来，这原因是“以太的漩涡”

② PBR 为 3 位提出者 Pussey、Barrett 和 Rudolph 的姓氏首字母。

（aethereal vortex）。19世纪，麦克斯韦在建立了电磁场理论之后，曾设想建立引力场理论。众所周知，这个引力场理论最终是由爱因斯坦完成的。在爱因斯坦的广义相对论中，引力只是时空曲率的表现，而不再是一种真实的力。

因此，无论是局限在量子力学现有框架之内来理解量子态，还是企图超越量子力学来理解量子态，哲学认知方式的重要性均不亚于数学认知方式的重要性。物理学理论中表征与实在之间的关系，始终是一个迷人而又深刻的哲学问题。在物理学史上，数学表征和物理实在之间的张力，是物理学革命的根本动力之一。

2 实体与性质：量子场论中的基本粒子是什么?

基本粒子是什么，是每一个学习量子场论的人都试图回答同时又说不清楚的问题。这里笔者参照一位科学作家的文章③，捡起 3 种有代表性的观点来进行讨论。这 3 种观点是：① 粒子是“波函数的坍缩”；② 粒子是“量子场的激发态”；③ 粒子是“对称群的不可约表示”。

首先我们从哲学角度来检讨第 1 种观点——粒子是波函数坍缩的结果。这种观点实际上要求我们要么接受玻尔关于量子力学的诠释，要么接受冯 · 诺依曼、维格纳或自发定域理论（GRW）的坍缩诠释。各种不同的坍缩诠释都是以量子态的实在性（或波包的真实性）作为前提的，所不同的是引起量子态或波包坍缩的机制。在冯 · 诺依曼看来，坍缩是意识参与的结果；在维格纳看来，坍缩是心灵作为独立实体干预物理世界的结果；而在 GRW 中，坍缩是一个自发的动力学过程。尽管各种坍缩诠释现在依然有一定市场，但基于本文第 1 节的分析，笔者持保留态度。

这里我们重点讨论玻尔的观点。首先要说明，所谓“哥本哈根诠释”其实是 20 世纪 50 年代发明的一个非常含混的说法，其基本要件包括玻恩的几率解释、海森堡的不确定性原理、玻尔的互补性原理和冯 · 诺依曼的投影假设及其波包坍缩诠释[10]。玻尔的互补性原理其实不是关于量子力学形式体系的诠释，而是关于量子系统性质的一种说明。玻尔承认原子是真实存在的，但认为原子的某些性质（如位置、动量、不同空间取向的自旋分量等）不是内禀的（intrinsic），而是外在的（extrinsic）。实际上，原子的这些性质是相对于宏观测量仪器而言的关系性质（relational properties）。玻尔[11]明言：“像‘我们不能同时知道一个原子客体的位置和动量’这样的陈述，人们立即会提出原子客体的这两种属性的物理实在性问题。这个问题只能这样来回答：只有相对于两种相互排斥的实验条件，一种条件下可以明确地使用时空概念，另一种条件下可以应用动力学守恒定律（我们才能谈论原子客体的位置或动量属性）。”玻尔在这里谈的是原子。鉴于量子力学是我们理解原子和基本粒子的基本理论，玻尔关于原子性质的观点显然可以推广到基本粒子。

第 2 种观点，即粒子是量子场的激发态的观点，显然是把场而非粒子作为最基本的实在。在量子场论中，每一种基本粒子对应于一个全时空的量子场。从物理学角度来讲，量子场论是目前已知的能够统一量子力学和狭义相对论的唯一方式。然而从哲学角度来讲，将量子场作为基本实在是一个巨大的本体论包袱。近些年来，物理学界越来越倾向于认为，包括量子电动力学在内的所有成功的量子场论都只是“有效场论”——某个深层理论的低能近似理论。借用温伯格[12]的话说，“基于这一立场，用量子场论来描述可达到的能量范围的物理学的理由在于，任何相对论性量子理论在足够低的能量范围内都会显得像量子场

③ Wolchover N. What is a Particle? http://www.quantamagazine.org/what-is-a-particle-20201112.

论。因此，重要的是按量子力学和狭义相对论的基本原理来理解量子场论的理论基础”。

由此看来，将粒子看成是量子场的激发态，无助于我们理解基本粒子是什么。欲理解基本粒子是什么，最重要的是量子力学和狭义相对论的结合所给出的粒子态的性质。这就是我们要检讨的第 3 种观点，即“粒子是群的不可约表示”。更准确地说，粒子的性质是由群的不可约表示所刻画的。

1939 年，维格纳建立了狭义相对论的时空对称群——庞加莱群（非齐次洛伦兹群）——在量子力学的希尔伯特空间中的表示理论。在庞加莱群的不可约表示理论中，可以并且只能构造两个卡西米尔算符，这两个卡西米尔算符的本征值分别对应于粒子的质量和自旋。卡西米尔算符是单位算符的倍数，这个倍数可以用来作为不可约表示的分类指标。因此，基本粒子首先是按质量和自旋来进行分类的：半整数自旋的为费米子，整数自旋的为玻色子。作为庞加莱群不可约表示的不变量，质量和自旋可以看成是粒子内禀的范畴性质（categorical properties）。

除了质量和自旋这样的内禀性质之外，基本粒子还有额外的内禀性质，如电子的电荷、夸克的色荷和味荷等。粒子的这些额外性质是由内部规范对称群的不可约表示来描述的。与电荷、味荷和色荷相联系的对称群分别是 U(1)、SU(2) 和 SU(3) 群。根据外尔和杨振宁的“对称性支配相互作用”的思想，这些群分别确定了电磁相互作用、弱相互作用和强相互作用的拉氏量。鉴于电荷、味荷和色荷是通过相互作用而表现出来的，在哲学上它们可以被归入倾向性质（dispositional properties）。

综上所述，哲学上关于性质和实体的讨论有助于理解基本粒子是什么这个问题。基本粒子不仅具有范畴性质（如质量、自旋）和倾向性质（如电荷、色荷）这样的内禀性质，也有关系性质（如位置或动量）这样的外在性质。实体（substance）是一个来自亚里士多德哲学中的术语，这里我们借用它来指称自然类（natural kinds）。相信自然界存在客观的分类结构，是一切科学研究的基础。自然类的传统代表是生物学中的物种，后来的代表是化学中的元素，如今则是物理学中的基本粒子。按照当代哲学家 Boyd[13]的观点，自然类是一个性质簇（clusters of properties）。

3 实体论与关系论：量子引力中的时间问题

如果我们像爱因斯坦一样相信量子力学是不完备的，是将来某个基础理论的极限情形，那么该基础理论应该就是量子引力理论，即统一量子力学和广义相对论的理论。建立量子引力理论的动机通常包括：① 如果物质场是量子化的，那么引力场或时空几何也应该是量子化的；② 广义相对论中的奇性定理，暗示该理论应该是个低能近似理论；③ 量子场论中的发散也有望通过引力量子化来解决。显然这些动机纯粹是理论性的；在经验层面，量子力学和广义相对论足够胜任。

建立量子引力理论的尝试有多条路径，这里我们只考虑正则量子引力途径，因为该进路的出发点是量子力学和广义相对论的基本原理，没有添加任何额外的假设（如超对称等）。正则量子引力理论包括量子几何动力学、联络动力学和圈量子引力理论。几何动力学选取三维类空超曲面 Σ 的 3-度规 h_{ab} 作为场位形变量，联动动力学选取 Σ 上 SU(2) 规范群联络（自旋联络）A_a^i 作为位形变量，圈理论则以自旋联络的“和乐”（holonomy）$h(A, \gamma)$ 来定义变量。在正则量子引力理论中，量子态表示为这些变量的波泛函 Ψ。

无论是选取 3-度规 h_{ab} 还是选取自旋联络 A_a^i 或其和乐 $h(A, \gamma)$ 作为变量，正则量子引力理论都会面临“时间问题”。这是因为引力场是一个约束系统，其次级约束包括（三维空间）微分同胚约束 H_a 和哈密顿约束 H（姑且取3-度规作为位形变量）

$$\hat{H}=h^{-\frac{1}{2}}(\pi^{ab}\pi_{ab}-\frac{1}{2}\pi^2-h^3R)=0。\qquad (2)$$

式（2）中，π^{ab} 为与 h_{ab} 共轭的动量，^3R 为 Σ 的曲率。按狄拉克的约束系统量子化方法，将经典哈密顿约束函数 H 提升为算符 $\hat{H}$，就得到正则量子引力理论的动力学方程：

$$H\Psi=0。\quad（3）$$

将式（3）与量子力学的薛定谔方程对照即可看出，正则量子引力理论中量子态不随时间演化。这就是正则量子引力理论中著名的"时间问题"。在经典理论中，这个问题并不存在。在广义相对论的相空间中，哈密顿约束所生成的轨道是爱因斯坦场方程的"解"，约束轨道上的点作为"初值"才是等价的[14]。广义相对论中的四维微分同胚群毕竟只是一个类规范群[15]，我们不能像处理规范等价那样，把哈密顿约束轨道上的点当成"物理上"完全等价的。

时间问题的根源在于量子力学和广义相对论的内在冲突。在量子力学中，时间是个外部参数，不是动力学算符。而在广义相对论中，时间是动力学变量。关于如何解决时间问题，学界的看法分为两个对立的阵营——赫拉克利特派和巴门尼德派[16]。以 Kuchař[17] 为代表的赫拉克利特派认为，时间是经典的和基本的概念，先于量子化而存在；而以 Rovelli[18] 为代表的巴门尼德派则认为，基础物理学中没有时间概念，经典的时间概念是量子化的结果。

按照 Kuchař 的主张，式（3）是不恰当的。在对引力场量子化之前，我们首先要完全约化相空间 $\Gamma^8=\{(h_{ab},\ \pi^{ab})\mid H_a=0=H\}$，确立时间参数和真正的动力学变量，然后再进行量子化。这一理解虽然符合量子力学精神，但实际上是不可行的。广义相对论的相空间最多只能约化到 $\Gamma^5=\Gamma^8/\{diff\Sigma\}$，即将空间微分同胚约束轨道上的点视为同一物理态。约化到 Γ^4 是不可能的：① 如果我们将哈密顿约束轨道约化为同一物理态，那么就没有了经典的时间概念；② 广义相对论的初值与解不是一一对应的。同一时空 $(M, g_{\mu\nu})$ 的两个不同的（3+1）分解会给出两个不同的初值 (h_{ab}, π^{ab}) 和 $(\bar{h}_{ab}, \bar{\pi}^{ab})$，但在相空间中两者并没有约束轨道相连。正如 Ward[19] 指出的，"建立引力的量子理论的主要障碍之一就是无法分离出该理论的物理自由度"。

按照 Rovelli 的主张，量子引力理论中没有时间概念。取代时间的，是"部分可观测量"之间的关系。部分可观测量指的是可以测量，但不能从理论上预言的物理量。换句话说，部分可观测量不是四维微分同胚不变的量，随哈密顿约束轨道的时间参数而演化。Rovelli 还主张，量子引力理论中不需要时间概念，我们可以用海森堡图像（态不变）来取代薛定谔图像（算符不变）。假设两个部分可观测量 $A(t)$ 和 $B(t)$ 相对于某个哈密顿量随参数 t 变化，那么我们可以用后者的变化来衡量前者的变化。对于某个确定的 t 值，设 $B(t)=\tau$，那么 $A(\tau(B))$ 是与哈密顿算符对易的完全可观测量。变化是用一组演化的运动常数（即当 B 取值 τ 时 A 的值）来显示的。按此主张，Rovelli 强调，统一的时间概念并不存在。

如果基础物理学中时间并不存在，那么经典时间概念从何而来？这里所说的经典时间概念不仅指牛顿力学或狭义相对论中的时间概念，也包括广义相对论中的时间概念。目前的流行方案是引入物质场 ϕ，从而将式（3）扩展为：

$$(\hat{H}_{\text{gravity}}+\hat{H}_{\text{matter}})\Psi(A,\phi)=0。\quad（4）$$

式（4）中 A 是引力场的位形变量，$\hat{H}_{\text{gravity}}$ 和 $\hat{H}_{\text{matter}}$ 分别是引力场和物质场的哈密顿算符。当物质场与引力场退相干时，物质场的哈密顿算符 $\hat{H}_{\text{matter}}=ih\frac{\delta}{\delta\phi}$ 可用来定义引力场量子态的演化。按此设想④，经典时间是从量子世界中演生或突现出来的。时间的准经典性质，

④ 这也只是一种设想而已。在几何动力学中，波泛函没有良好定义，哈密顿算符由于不是正则变量的多项式，所以尚无合理的构造方案。圈量子引力理论虽然建立了数学上严格的运动学希尔伯特空间（即自旋网络态或自旋扭结态，前者是面积算符和体积算符的本征态），但圈量子引力的动力学仍然是一个艰难的问题，广义相对论能否作为该理论的极限依旧悬而未决。

也暗示量子力学中的希尔伯特空间只是一个近似结构[20]。

时间（或时空）到底是实体还是关系，一直是哲学上长期争论的问题。在牛顿力学创立之前，人们通常是把时间看成变化的事物之间的关系。日常生活实践中，人们总是用周期运动（年、月、日等）来度量时间的。因此，柏拉图在《蒂迈欧篇》里说，时间是运动的影像，是伴随转动天球的出现而产生的。而在牛顿力学和狭义相对论中，时间是绝对的、均匀流失的实体，不依赖于事物的运动或变化而独立存在。牛顿的绝对时空观曾受到莱布尼兹的激烈反对，后者主张时空不过是事物的相邻或接续关系。马赫后来对牛顿的绝对时空观的批判，对爱因斯坦创立广义相对论产生过启发作用。

在广义相对论中，时空的几何性质（如联络和度规）取决于事物的分布和运动，但时空的拓扑性质（如点集结构、连续性和光滑性）则是该理论的基本假设。换句话说，广义相对论中的时空点依然可以看成是实体，时间即时空做（3+1）分解之后的一维连续统。如今，时空点的实体论（substantialism）也受到了量子引力理论发展的挑战。按照正则量子引力理论，作为一维连续统的整体时间概念或许根本就不存在。由此看来，量子力学的希尔伯特空间结构和广义相对论的黎曼几何结构都只是未来基础理论的极限情形。鉴于量子引力理论是普朗克尺度上的物理学，远远超出了实验物理的范围，哲学上的讨论和数学上的推理就显得尤为重要。

4 结语

量子态的本体论地位问题、何谓基本粒子的问题，以及时间是否存在的问题，无疑分别是量子力学、量子场论和量子引力理论中最核心的问题。在物理学和哲学之间建立更紧密的联盟，将有助于这些问题的澄清与解决。

事实上，任何物理学理论的内核都是一些基本的形而上学预设。在牛顿力学和牛顿引力理论中，这些基本预设包括绝对时空、微粒物质和超距作用力。电磁理论和狭义相对论只是适度修正了这些基本预设，即用闵氏时空取代了伽利略时空，用连续传递作用取代超距作用，同时将场也看成是物质的一种形态，从而完善了经典物理学的世界图像。

20 世纪初的两大物理学革命——量子力学革命和广义相对论革命，分别对经典的物质和时空概念做出了根本性的修正。一方面，量子力学要求我们承认物质的“波粒二象性”，但这个波不是普通三维空间中的物质波，而是抽象的希尔伯特空间中的几率幅。另一方面，根据广义相对论，时空也不再是物质活动的舞台，而是物质分布和运动的结果。在本体论层面，我们仅仅承诺了时空是一个四维的伪黎曼流形。遗憾的是，量子力学和广义相对论无论在物质观还是在时空观上都存在潜在的冲突。量子引力理论尚处在探索的初期，但超弦进路的 AdS/CFT 对偶理论暗示，时空几何和量子纠缠之间似乎存在神秘的联系。如果这一设想能够成立，那么建立一幅自洽世界图像的曙光已经初现。

在 1918 年普朗克 60 华诞的庆祝会上，爱因斯坦发表了关于“探索的动机”的著名演讲。爱因斯坦[21]指出，科学的殿堂里有许多房舍，里面住着各式各样的人，引导他们来此的动机也各不相同。大多数人来此，是出于实际功利的或智力消遣的目的，只有很少一部分人，是为了“以最适当的方式来画出一幅简化的和易领悟的世界图像”，是渴望看到莱布尼兹所表述的“先定的和谐”。这部分人数虽然不多，但科学殿堂里若是缺了他们，“正如只有蔓草就不成其为森林一样”。他们从事科研工作的精神状态，“是同信仰宗教的人或谈恋爱的人的精神状态相类似的”。这种渴望看到先定和谐的激情，“是无穷的毅力和耐心的源泉”。

爱因斯坦所说的很少一部分人，正是我们通常所称的“哲人科学家”，即具有崇高的哲学情怀、广阔的哲学视野和深邃的哲学思想的科学家。哲学与物理学在量子世界的相遇，正是哲人科学家出现的契机。哲学与物理学之间的联系，其实不亚于数学与物理学之间的联系。如果说数学语言是自然界的句法，那么哲学分析的就是句法背后的语义。未来能够统一量子力学和广义相对论的基础理论，可能需要有不同于希尔伯特空间和黎曼流形的新数学结构，但更需要有关于时空、物质和相互作用等物理实在的新哲学思想。

参考文献

1 卡尔罗·罗维利, 朱科夫. 物理学需要哲学, 哲学需要物理学. 科学文化评论, 2019, 16(2): 107-119.

2 H. 弗洛里斯·科恩. 世界的重新创造：近代科学是如何产生的. 张卜天, 译. 长沙: 湖南科学技术出版, 2012.

3 郝刘祥. 自然的数学化 关于科学革命编史纲领的探讨. 科学文化评论, 2014, 11(5): 5-23.

4 Harrigan N, Spekkens R W. Einstein, incompleteness, and the epistemic view of quantum states. Foundations of Physics, 2010, 40(2): 125-157.

5 Pusey M F, Barrett J, Rudolph T. On the reality of the quantum state. Nature Physics, 2012, 8(6): 475-478.

6 Jammer M. 量子力学的哲学：量子力学诠释的历史发展. 秦克诚, 译. 北京: 商务印书馆, 1989: 6.

7 Montina A. State-space dimensionality in short-memory hidden-variable theories. Physical Review A, 2011, 83(3): 032107.

8 郝刘祥, 夏树. PBR定理与量子态的实在性. 自然辩证法通讯, 2018, 40(3): 46-52.

9 爱因斯坦. 爱因斯坦文集（第一卷）. 许良英, 译. 北京: 商务印书馆, 1976: 369.

10 郝刘祥. 不确定性原理的诠释问题. 自然辩证法通讯, 2019, 41(12): 24-33.

11 Bohr N. On the notions of causality and complementarity. Dialectica, 1948, 2 (3/4): 312-319.

12 Weinberg S. The Quantum Theory of Fields. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.

13 Boyd R. Realism, anti-foundationalism and the enthusiasm for natural kinds. Philosophical Studies, 1991, 61(1/2): 127-148.

14 Pons J M, Salisbury D C, Sundermeyer K A. Revisiting observables in generally covariant theories in the light of gauge fixing methods. Physical Review D, 2009, 80(8): 084015.

15 郝刘祥. 等效原理与引力的规范理论. 自然科学史研究, 2011, 30(2): 241-255.

16 Belot G, Earman J. Physics Meets Philosophy at the Planck Scale. Cambridge: University Press, 2001: 213-255.

17 Kuchař K V. Canonical Quantum Gravity// General Relativity and Gravitation 1992. Bristol: Institute of Physics Publishing, 1993: 119-150.

18 Rovelli C. Quantum Gravity. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

19 Ward R M. General Relativity. Chicago: The University of Chicago Press, 1984: 266.

20 克费尔, 郝刘祥. 量子引力中时间存在吗？. 科学文化评论, 2012, 9(1): 88-96.

21 爱因斯坦. 探索的动机// 爱因斯坦文集（第一卷）.许良英, 译. 北京: 商务印书馆, 1977: 100-103.

Philosophy and Physics Meet in Quantum World

HAO Liuxiang

(1 Institute of Philosophy, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2 School of Humanities, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract On the basis of discussion about the ontological status of quantum state in quantum mechanics, the properties of particle in the quantum theory of fields and the problem of time in the canonical quantum gravity, the author argues that the hard core of any physical theory consists of some metaphysical assumptions. The author points out that from the perspective of the history and philosophy of science, the relationship between philosophy and physics is in some way analogous of that between mathematics and physics, so the reunion of philosophy and physics will help us to clarify and even solve those fundamental problems in quantum theories.

Keywords quantum state, elementary particles, problem of time, reality, substance, relation, property



郝刘祥 中国科学院哲学研究所所长，中国科学院大学人文学院哲学系教授。主要从事科学哲学和科学思想史的教学与研究，特别关注现代科学的哲学基础和科学革命的思想渊源。《科学文化评论》执行主编。在物理学哲学、科学革命的编史学和规范理论的早期历史等领域发表过多篇论文。E-mail : haoliu@ucas.ac.cn

HAO Liuxiang Director of the Institute of Philosophy, Chinese Academy of Sciences (CAS), Professor of the School of Humanities, University of Chinese Academy of Sciences (UCAS), and Executive Editor-in-Chief of *Science & Culture Review*. Professor Hao mainly engages in the research on philosophy of science and history of scientific ideas, especially on the philosophical foundations of modern sciences, and has published many articles in the areas of philosophy of physics, historiography of the scientific revolution and the early history of gauge theory. E-mail: haoliu@ucas.ac.cn

■责任编辑：文彦杰